

Niching 유전 알고리즘을 이용한 희토류 자석 BLDC 모터의 최적설계

*정병호, *정태경, **진용선
*중앙대학교, **(주)성신

An Optimal Design of BLDC Motor Using Rare Earth Magnet
By Niching Genetic Algorithm

*Byung-Ho Chung, *Tae-Kyung Chung, **Yong-Sun Jin
*Chung-Ang Univ., **SungShin

Abstract - In this paper, we discussed an optimal design of BLDC motor using rare earth magnet. In motor design using rare earth magnet, because of the characteristics that rare earth magnets have high remanence, the effect of saturation of steel has to be considered. For this, we used nonlinear finite element method. For optimal design, a Niching genetic algorithm is used. As a result, we found out a set of BLDC motor shapes increasing motor efficiency, and decreasing cogging torque.

이터를 가지고 토오르크를 계산하여 그 토오르크들의 표준편차 결과를 되돌린다. 프로그램의 흐름도는 그림 1과 같다.

1. 서 론

최근 페라이트 자석은 희토류 자석으로의 대체가 이루어지고 있다. 이는 희토류 자석의 가격이 떨어지고 있고 매우 큰 잔류 자속 밀도와 큰 항자력 그리고, 2상한에서 골극점이 없는 희토류 자석의 특성때문이라고 볼 수 있다. 희토류 자석을 이용한 모터는 페라이트를 이용한 모터와 비교할때 같은 체적으로 더 좋은 효율과 더 큰 토오르크를 갖는다. 그러나 희토류 자석을 이용한 모터 설계는 희토류 자석의 큰 잔류 자속 밀도 때문에 철의 포화에 대해 고려해야하는 어려움을 가지고 있다.

본 논문에서는 먼저 모터 설계를 위한 설계변수를 결정하고 이를 최적화 알고리즘에 적용하기 위해서 상용 프로그램인 Emfis의 스크립트 파일을 변형하여 유한요소해석을 자동으로 계산하는 프로그램을 만들고 철의 포화를 고려하기 위하여 비선형해석을 실시하였다. 전기기기의 형상이나 구조설계 최적화 문제는 전역 최적점 외에 목적함수의 크기가 같은 여러 개의 국소 최적점이 존재하는 multi-modal인 경우가 많기 때문에 탐색 공간에서 여러 해를 병렬적으로 찾을 수 있게 하는 니칭 유전 알고리즘(Niching genetic algorithm using RCS)을 사용하여 여러개의 최적 모델을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 매개변수 유한요소법

매개변수 유한요소해석(Parametric Finite Element Analysis)은 기존의 유한요소법이 구현된 패키지나 프로그램을 기반으로 하여 상위 개념으로 정의될 수 있는 방법론으로 매개변수로서는 a)형상 b)요소밀도 c)의부입력 d) 재질값 등을 들 수 있다. 이러한 매개변수를 사용자가 직접 변경하거나 주어진 범위만큼 자동으로 변화되게 하여 일련의 집합된 결과를 사용자에게 제공한다.

본 논문에서는 상용프로그램인 Emfis 프로그램의 형상 및 재질 특성, 경계조건, 비선형데이터 등의 유한요소 해석에서 필요한 모든 정보를 가지고 있는 MSC 스크립트 파일을 이용하여 이를 구현하였다. 매개변수로서는 자석의 형상과 공극의 길이, 전류밀도를 사용하였다. 제작된 매개변수 유한요소해석 프로그램은 입력 매개변수를 받아 MSC 파일을 변형하여 새로운 모터 형상을 모델링한 후 자동으로 요소를 분할하고 해석한 후 그 대

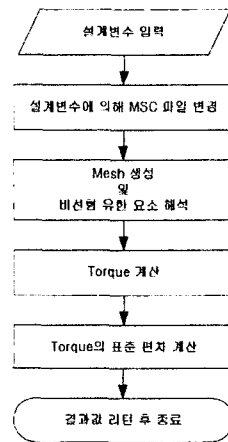


그림 1. 매개변수 유한요소해석 프로그램의 흐름도

2.2 Niching 유전 알고리즘

자연 생태계에서는 비슷한 모습을 가진 개체들의 집합인 종(specie)들이 각각의 자기영역과 역할을 가지고 있는데 이것을 니체(niche)라고 한다. 이러한 생물학의 니체와 종의 개념을 multi-modal 최적화 문제를 해결하기 위해 유전 알고리즘에 도입하는데, 니체는 multi-modal한 탐색 공간 내에서의 각 피크점들의 위치, 종은 전체 개체 집단(population) 중에서 서로 어떤 주어진 거리(niche radius)내에 있는 개체들에 해당된다고 할 수 있다. 그리고 이러한 니체들을 탐색하는 유전 알고리즘을 니칭 유전 알고리즘이라 한다. 이러한 니칭 유전 알고리즘에는 sharing과 crowding, RCS(restricted competition selection)가 있다. 본 논문에서는 RCS 방법을 적용하였다.

이 방법은 엘리트 집단(elite set)이 있어서 한번 탐색한 피크점은 더 좋은 피크점이 나타날 때까지 항상 보관하게 된다. 탐색 과정 중에 찾은 피크치를 저장하고 그 피크치 주위에 있는 점들은 다음 세대에서는 선택이 되지 않도록 함으로서 다른 니체내의 개체가 적합도가 낮더라도 선택되도록 하여서, 니체 개체들간의 경쟁을 제한하므로 개체의 다양성을 유지하여 여러 국소 최적점들을 탐색할 수 있게 된다.

이와 같은 새로운 니칭 유전 알고리즘을 적용하여 설계 대상물의 가장 중요한 특성 하나만을 목적함수로 선정 후에 여러 개의 최적해 후보들을 탐색한다.

그럼 2에서 RCS 기법을 사용한 Niching 유전 알고리즘의 흐름도를 보여주고 있다.

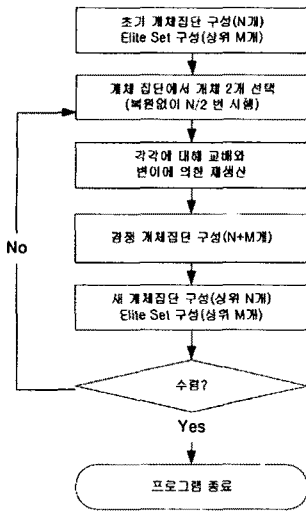


그림 2. Niching 유전 알고리즘(Using RCS)의 흐름도

본 논문에서는 Niching 유전 알고리즘 적용시 개체의 적합도로 매개변수 유한요소법에서 계산된 토크들의 표준편차 값을 사용하였다.

2.3 회로류 자석을 이용한 모터의 최적설계

2.3.1 기존 페라이트 BLDC 모터

표 1은 기존의 페라이트 BLDC 모터의 설계사양을 보여주고 있다.

| Stator 외경 | 60 mm |
|-----------|--------------------------|
| Stator 내경 | 35 mm |
| 공극의 길이 | 0.5 mm |
| 자석의 각도 | 43 degree |
| 자석의 길이 | 6.88 mm |
| 전류밀도 | 3848450 A/m ² |

기존의 페라이트 BLDC 모터의 토크 파형은 15도의 주기성을 가지므로 0도부터 14도까지 회전시키며 각각의 토크를 구하였다. 이 모터의 평균 토크는 1.406 Kg·cm이고 토크 표준편차는 0.15123이다.

기존의 페라이트 BLDC 모터의 형상과 토크 파형은 그림 3과 그림 4에서 보여진다.

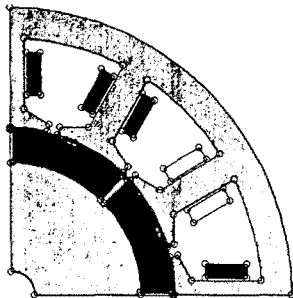


그림 3. 기존 페라이트 BLDC 모터의 형상

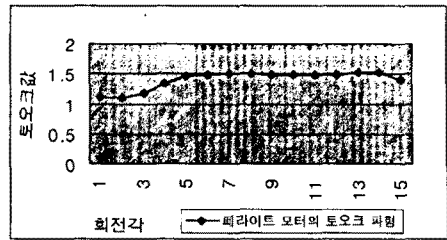


그림 4. 기존 페라이트 BLDC 모터의 토크

2.3.2 설계변수와 목적함수

1) 설계변수

공극의 길이와 자석의 각도, 자석의 길이, 전류밀도를 설계변수로 잡아 계산하였다. 그림 5는 모터의 설계변수를 보여주고 있다.

표 2. 설계변수들의 범위

| | 공극길이 | 자석각도 | 자석길이 | 전류밀도 |
|--------------|------|------|------|---------|
| X_{min} | 0.5 | 30 | 0.5 | 1000000 |
| X_{max} | 3.5 | 44 | 3.5 | 3500000 |
| Niche Radius | 0.5 | 1.4 | 0.5 | 250000 |

단위 : 길이(mm), 각도(degree), 전류밀도(A/m²)

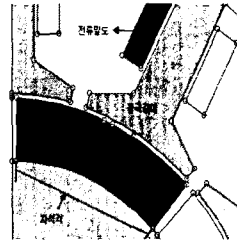


그림 5. 설계변수

2) 목적함수

모터의 코깅 토크를 감소시키기 위해 목적함수로서 토크의 표준편차를 사용하였다.

$$\text{목적함수} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\tau_i - \tau_{avg}]^2}{N-1}} \quad (1)$$

τ_i : i 번째의 각의 토크 값

τ_{avg} : a. 페라이트 모터의 토크 평균값

b. 회로류 모터의 토크 평균값

N : 총 계산해야할 각들의 수

이 목적함수를 이용하여 첫 번째 계산에서는 페라이트 모터와 비슷한 토크 특성을 가지는 최적모델을 두 번째 계산에서는 페라이트 모터보다 더 큰 토크 파형을 가지면서 더 적은 코깅 토크를 가지는 회로류 BLDC 모터의 최적모델을 찾았다.

2.3.3 회로류 BLDC 모터의 최적 모델

1) 회로류 BLDC 모터의 최적 모델 1

위에서 설명된 방법으로 기존 페라이트 모터와 비슷한 토크를 갖는 모터를 설계하기 위해 목적함수의 평균

토크값을 기존의 페라이트 모터의 평균토크값으로 계산하여 구한 최적모델들을 아래 표 3에서 볼 수 있다. 그림 6과 그림 7은 표 3의 최적 모델 1의 형상과 토크 파형을 보여주고 있다.

표 3. 목적함수의 토크 평균으로 기존의 페라이트 모터의 토크 평균을 사용했을때의 최적모델의 설계변수

| 번호 | 공극길이 | 자석길이 | 자석각도 | 전류밀도 | 평균토크 | 표준편차 |
|----|--------|--------|-----------|---------|---------|---------|
| 1 | 1.7831 | 1.6081 | 32.947356 | 2522178 | 1.4165 | 0.0675 |
| | | | | | | 0.06601 |
| 2 | 1.7301 | 3.1862 | 32.901920 | 1949800 | 1.5773 | 0.2041 |
| | | | | | | 0.09531 |
| 3 | 3.2660 | 3.0705 | 32.939860 | 2781707 | 1.52905 | 0.1693 |
| | | | | | | 0.10756 |

*표준편차의 위쪽 : 페라이트 모터의 평균토크와 비교

*표준편차의 아래쪽 : 자신의 평균토크와 비교

단위 : 길이(mm), 각도(degree), 전류밀도(A/m²), 토크(Kg·cm)

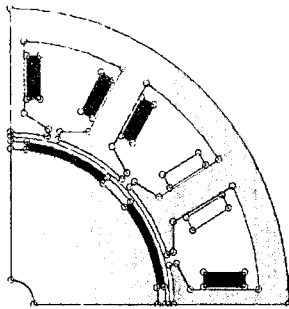


그림 6. 표 3의 회토류 BLDC 모터의 최적 모델 1의 형상

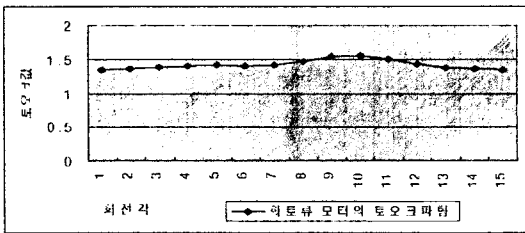


그림 7. 표 3의 회토류 BLDC 모터의 최적 모델 1의 토크 파형

표 3에서 보여진 것처럼 설계된 최적 모델들은 같은 면적에서 더 작은 전류밀도로서 더 좋은 토크 파형을 보여주고 있다. 이 설계는 더 작은 전류를 사용할 수 있게 함으로써 효율을 높일 수 있었고 기존의 페라이트 모터보다 더 작은 코깬토크를 가진다고 할 수 있으므로 잘 설계되었다고 볼 수 있다.

2) 회토류 BLDC 모터의 최적 모델 2

목적함수의 평균 토크값을 설계된 회토류 모터의 평균토크값으로 계산하여 구한 최적모델들을 아래 표 3에서 볼 수 있다. 그림 8과 그림 9는 표 4의 최적 모델 1의 형상과 토크 파형을 보여주고 있다.

표 4. 목적함수의 토크 평균으로 회토류 모터의 토크 평균을 사용했을때의 최적모델의 설계변수

| 번호 | 공극길이 | 자석길이 | 자석각도 | 전류밀도 | 평균토크 | 표준편차 |
|----|----------|---------|-----------|---------|-------|--------|
| 1 | 0.925295 | 1.56524 | 32.900145 | 2721115 | 1.977 | 0.1239 |
| | | | | | | 0.0642 |
| 2 | 3.05438 | 2.66553 | 32.93048 | 3172279 | 1.628 | 0.0642 |
| | | | | | | 0.0642 |

단위 : 길이(mm), 각도(degree), 전류밀도(A/m²), 토크(Kg·cm)

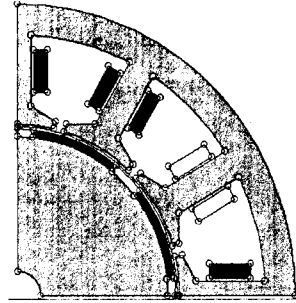


그림 8. 표 4의 회토류 BLDC 모터의 최적 모델 1의 형상

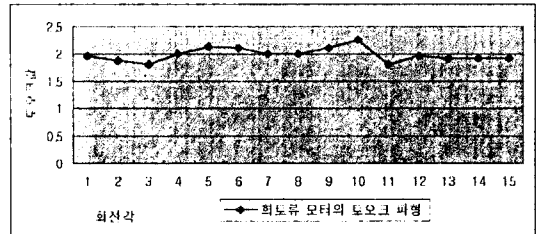


그림 9. 표 4의 회토류 BLDC 모터의 최적 모델 1의 토크파형

표 4에서 보여진 것처럼 설계된 최적 모델들은 같은 면적에서 더 작은 전류밀도로서 토크의 평균 토크값들이 더 크고 더 좋은 토크 파형을 보여주고 있다. 이 설계는 더 작은 전류를 사용할 수 있게 함으로써 효율을 높일 수 있었고 기존의 페라이트 모터보다 더 적은 코깬토크를 가지면서 같은 부피에서 더 큰 토크를 얻을 수 있었으므로 잘 설계되었다고 볼 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 매개변수 유한요소법의 비선형 해석과 니칭 유전 알고리즘을 이용하여 기존 BLDC 모터의 페라이트 자석을 회토류 자석으로 교체하는 설계를 하였다. 결과로서 기존의 모터와 같은 토크 특성을 가지면서 더 좋은 효율을 가지는 BLDC 모터 모델과 더 좋은 효율과 더 큰 토크를 가지는 BLDC 모터의 모델을 제시하였다.

[참고 문헌]

- [1] J.R. Hendershot and T.J.E. Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994.
- [2] David E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [3] S.J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [4] 이철균, "Niching 유전 알고리즘을 이용한 전기자동차용 유도전동기의 최적설계", 서울대학교 공학박사 학위 논문, 1998.
- [5] 최홍순, "스페이스 매핑과 매개변수 유한요소 해석에 의한 전기기기 설계", 서울대학교 공학박사 학위 논문, 2000.